堤防裏のり尻部の洗掘現象の把握と 対策工配置条件の基礎的検討

吉森 佑介¹・倉上 由貴²・二瓶 泰雄³・森田 麻友¹

¹学生会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:7614634@ed.tus.ac.jp

²学生会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士課程 (同上)

E-mail:7615701@ed.tus.ac.jp

³正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (同上)

E-mail:nihei@rs.noda.tus.ac.jp

津波越流に伴う三面コンクリート張り堤防（アーマ・レビー）の決壊要因としては、コンクリート製被覆工の流失と裏のり尻部の洗掘が挙げられる。後者の課題を解決するために、本研究では、堤防裏のり尻部の洗掘現象の基本特性を把握し、洗掘対策工の配置条件が洗掘特性や堤防の耐越流侵食性に及ぼす影響を検討する。そのため、小型水平開水路を用いて、洗掘実験と越流侵食実験の2種類の実験を行う。実験結果より、1) 裏のり側の洗掘量は、のり面勾配の影響を大きく受け、1割勾配>5分勾配>2割勾配の順に大きい。2) 洗掘工の配置条件により、裏のり側の洗掘量や堤防の耐越流侵食状況が変化し、本条件では下流側の矢板を伴う広域洗掘工が対策工として有用である。

Key Words : levee, scour, overflow, geotextile, armored levee

1. はじめに

東日本大震災では、岩手・宮城・福島3県における海岸堤防総延長の約60% (約190 km) が全壊・半壊した¹⁾。これらの決壊した堤防には、三面コンクリート張りであり、河川では耐越水堤防とも呼ばれるアーマ・レビー²⁾が多く含まれている。一般的な河川堤防の決壊要因としては、「表のり面側の洗掘・河岸侵食」、「浸透」、「越流」などが挙げられるが³⁾、このうち越流が決壊の8割を占めると言われている³⁾。上記の大震災時にも、津波が海岸堤防を越流したために多くの海岸堤防が全半壊したものと考えられる。今後の津波対策では、海岸堤防を越流する規模のL2津波を対象として含んでおり⁴⁾、越流時にも粘り強く壊れない海岸堤防強化技術の開発が喫緊の課題である。

越流に伴う堤防決壊の基本メカニズムとしては、三面コンクリート張りのアーマ・レビー（以下、従来形式堤防と称す）については、1) 揚圧力等による天端・裏のり面の被覆工の流出、2) 裏のり尻部での局所洗掘による被覆工の不安定化・流出、が挙げられる。このため、堤防の耐越流侵食性強化技術のキーポイントは、天端や裏のり面の被覆工流出をいかに抑制するかである。この

対策のうち1) に関しては、ジオテキスタイル補強土（GRS）により堤体とのり面の被覆工を一体化する工法（GRS堤防、以下、新形式堤防）が提案され、河川堤防^{5)・6)}や津波用の防潮堤強化技術^{7)~9)}に適用され、GRS堤防の高い耐越流侵食性が検証されている。

上記2) に関しては、大規模実験に基づく裏のり尻部における洗掘特性の把握や洗掘対策工の部材や大きさの検討が行われると共に¹⁰⁾、津波被災状況の解析から洗掘対策の重要性が指摘されている^{11)・12)}。しかしながら、裏のり尻部の洗掘現象の実験事例が多くなく、堤防ののり面勾配などの影響に関する知見は不十分である。さらに、洗掘対策工そのものについて十分な検討はなされていない。

本研究では、複数ののり面勾配条件下における堤防裏のり尻部の洗掘現象の基本特性を把握すると共に、洗掘対策工の配置条件を工夫し、堤防の耐越流侵食性向上効果を検討することを目的とする。そのため、小型水平開水路を用いて、洗掘実験と越流侵食実験の2種類の実験を行う。洗掘実験では、まず、洗掘防止工が無い条件下における越流時の堤防裏のり尻部での洗掘状況の基本特性を把握すると共に、洗掘防止工敷設時の洗掘特性の変化状況を検討する。越流侵食実験では、複数の洗掘防止

図-1 洗掘実験の概要 (Case C の広域洗掘工の場合)

表-1 洗掘実験の条件

Case	洗掘工 種類	局所工長 さ L_1 [cm]	矢板までの 距離 L_2 [cm]	裏のり面 勾配
A	無し	-	-	2割
B	矢板 のみ	-	90	2割
				1割
				5分
C	広域	20	90	2割
		6.5	90	
			30	
		2	90	

工の配置条件を従来・新形式堤防に適用し、洗掘工の配置条件の違いによる耐越流侵食特性を把握する。

2. 実験方法

(1) 洗掘実験

堤防裏のり尻部における洗掘状況の基本特性や洗掘防止工の有効性を把握するために洗掘実験を行う。ここでは、図-1 に示す長さ 5m、幅 0.2m、高さ 0.35m の小型水平開水路に、高さ 7cm、天端幅 5cm の木製堤体模型の背後に厚さ 21cm (堤体高さの 3 倍) の基礎地盤を敷設する。模型縮尺を 1/70 としており、実スケールでは高さ 5m の堤防を想定している。この堤体高さ基礎地盤厚さは、実験水路で設定できる範囲で最大のものを選定した。また、基礎地盤の材料は最適含水比 16% の豊潤豊浦砂 (中央粒径 0.18mm) を用い、厚さ 2cm 毎に JIS A 1210 の標準プロクターに基づく締固め度 D_c が 90% となるように締固めた。

洗掘実験では、表-1 に示すように、洗掘工の配置としては、局所洗掘工や矢板が無い Case A、土留め用の矢

図-2 両洗掘工の概要

板のみある Case B、裏のり尻部の局所洗掘工と矢板を組み合わせた Case C (以下では、広域洗掘工と称す) とする (図-2)。堤防部分の勾配としては、表のり面は全て 2 割とするが、裏のり面については Case A、C は 2 割、Case B は 2 割、1 割、5 分とする。堤防裏のり尻から矢板までの距離 L_2 は、Case B では 90cm のみ、Case C では 30、90cm とする。また、Case C における局所工の長さ L_1 としては 2、6.5、20cm (堤防高さの約 0.3、約 1、約 3 倍に相当) の 3 ケースとする。なお、基礎地盤の敷設長さは Case A では 110cm、他の 2 ケースは矢板までの距離に相当する。なお、長さ L_2 に関しては、水路長さの関係でここでは 90cm を最長とする。

越流条件としては、流量 $Q=3.21 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ と越流水深 3.0cm と固定している。模型縮尺 ($=1/70$) より、実スケールでの越流水深は 2.1m となる。吉川³⁾に記載された越流水深と越水時間による河川堤防決壊の関係図より、実スケールでの越流時間は約 27 分となり、フルードの相似則による時間的縮尺 ($=\sqrt{1/70}$) から、本実験での越流時間 192s を基準とする。計測では、基礎地盤の侵食状況を DV カメラ (HDR-XR550V, SONY 製) を用いて基礎地盤の側面・上面の 2 方向から同時にビデオ撮影し、基礎地盤の侵食量を定量評価する。

(2) 越流侵食実験

洗掘防止工の配置条件と堤防の耐越流侵食性向上効果を確認するために、従来・新形式堤防に局所・広域洗掘防止工を組み合わせた越流侵食実験を行う。ここでは、図-3 に示すように、洗掘実験と同じ小型水平開水路に、従来・新形式堤防を設置する。具体的には、倉上ら⁵⁾・⁶⁾と同様に、厚さ 5cm の基礎地盤の上に堤体高さ 20cm、天端幅 10cm、2 割勾配の堤体を置く (模型縮尺は 1/25 に相当)。堤体作成については、三面を被覆工でカバーする従来形式堤防では、コンクリートと比重がほぼ同じであるアルミニウム板 (厚さ 0.5cm) を被覆工として使用

図-4 3つのり面勾配条件下の洗掘形状の比較 (Case B, $t=30s, 150s, X=0$ は裏のり尻部に相当)

越流条件は流量 $Q=5.61 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ と越流水深 6.0 cm とする。吉川³⁾に基づいて、模型縮尺(=1/25)から得られる実スケールでの越流水深(=1.5m)の条件では、破堤時間は実スケールでは約50分となるので、フルードの相似則により、本実験での越流時間の基準を10分とする。

(1) のり面勾配と洗掘特性の関係

勾配	2割	1割	5分
最大洗掘深	—	—	—
裏のり尻部の洗掘深	- -	- -	- -

Figure 10 is a line graph showing the relationship between scour depth (cm) and time (s) for three different cases: 2割 (20%), 1割 (10%), and 5分 (5%). The Y-axis represents scour depth (洗掘深) in cm, ranging from 0 to 21. The X-axis represents time (越流時間) in seconds (s), ranging from 0 to 200. The legend indicates that solid lines represent the maximum scour depth (最大洗掘深) and dashed lines represent the scour depth at the back-slope (裏のり尻部の洗掘深). The 5分 case (red lines) shows the highest scour depth, reaching approximately 18 cm. The 2割 case (blue lines) reaches about 15 cm, and the 1割 case (green lines) reaches about 12 cm. The back-slope scour depth is generally lower than the maximum scour depth.

5分勾配の場合には、最大洗掘深の現れる位置が裏のり尻側にシフトしており、洗掘形状が裏のり面勾配により異なることが分かる。

I_1119

図-7 矢板有無による水面形と基礎地盤侵食状況 (Case A, B)

(2) 洗掘工の配置条件の効果

a) 矢板の有無の影響

洗掘対策工の配置条件が堤防裏のり尻周辺およびその背後における洗掘特性に及ぼす影響を確認する。まず、矢板の有無による水面形と基礎地盤侵食状況を比較したものを図-7に示す。ここでは、裏のり面が2割勾配のCase AとCase Bの実験結果を用い、実験開始から20s, 50s, 70sの結果を図示している。なお、 $X=3\text{cm}$ は木製模型との境界部に位置する(図-1)。これを見ると、 $t=20\text{s}$ では、両ケースにおいて、裏のり尻部付近では水面形・侵食形状ともに大きな違いは見られないが、Case Aでは基礎地盤下流端での侵食が始まり、侵食深は水路底面まで到達している。次に、 $t=50\text{s}$ では、 $X=10\sim 20\text{cm}$ 付近の洗掘が進行している様子は両ケース共に共通している。しかしながら、Case Aでは基礎地盤下流側の侵食が上流側に進行するのに対して、Case Bでは全く侵食されていない。さらに $t=70\text{s}$ では、この状況が進み、Case Aでは堤防裏のり尻付近と基礎地盤下流側の洗掘部分が合体し、両ケースに大きな差異が生じた。このように、下流側に矢板を設置しないと、裏のり尻下流側の侵食が顕著となり、その影響が波及して裏のり尻部の洗掘の顕在化を引き起こす。そのため、広域洗掘工における下流側の矢板設置は、

 図-8 様々な局所工の長さ L_1 における洗掘特性の比較 ($t=192\text{s}$, Case C, $L_2=90\text{cm}$)

$L_1[\text{cm}]$	0	2	6.5	20
最大洗掘深	—	—	—	—
裏のり尻部の洗掘深	---	---	---	---

 図-9 洗掘深さの時系列変化 (Case C, $L_2=90\text{cm}$)

裏のり尻の洗掘防止に大きく寄与するものと思われる。なお、これらは矢板までの長さ L_2 の影響があるものと思われるが、その結果は後述する。

b) 局所工の長さ L_1 の影響

次に、裏のり尻部の局所洗掘工と下流側の矢板を合わせた広域洗掘工の洗掘特性を調べるために、Case Cにおける局所洗掘工と矢板までの距離 $L_2=90\text{cm}$ とし、局所工長さ $L_1=0, 2, 6.5, 20\text{cm}$ とした時の洗掘形状を図-8に示す。なお、 $L_1=0\text{cm}$ のケースはCase Bの結果である。また、想定堤防決壊時間である $t=192\text{s}$ の結果を抽出している。これより、局所工が無い時 ($L_1=0$) には、洗掘深は12cmまで達し、裏のり尻部直下も7cm程度掘れている。一方局所工を設置すると、背後地の洗掘量は大幅に減り、特に裏のり尻部直下の洗掘量はほぼ0となる。また、局所工長さ L_1 と共に、背後地における洗掘量は減少する。このように対策工の配置により洗掘抑制効果が大幅に向上することが示された。

そこで、より長い時間にわたる洗掘状況を把握するために、同じ4ケースにおける最大洗掘深と裏のり尻部直下の洗掘深さの時系列変化を図-9に示す。越流開始直後から洗掘工が無いケース ($L_1=0$) の洗掘深さが最も大きくなるが、 $t=240\text{s}$ 以降では、 $L_1=2\text{cm}$ の洗掘工のケースも大きい。一方、 $L_1=6.5\text{cm}, 20\text{cm}$ のケースでは、最大洗掘深も相対的に浅く、かつ、裏のり尻部直下の洗掘深さは常に0であり、堤体の安定化に大きく寄与している。洗掘工長さ L_1 により洗掘状況が変化した要因を見るため

図-10 $L_1=2\text{cm}$ (a)と 6.5cm (b)における水面形と基礎地盤の洗掘状況 (Case C, $L_2=90\text{cm}$)

に、Case C の $L_1=2\text{cm}$ と 6.5cm におけるビデオ動画のスナップショットを図-10 に示す。これより、 $L_1=2\text{cm}$ の場合には、洗掘工下流側に形成される波状跳水是しばらく安定しているが ($t=192\text{s}$)、跳水が流下方向に前後して不安定化すると跳水の渦が洗掘工下側に到達し局所洗掘が進行して、局所工周辺が大きく洗掘される ($t=268\text{s}$)。一方、 $L_1=6.5\text{cm}$ の場合には、波状跳水の変動に伴う局所洗掘の進行は見られず、安定した流況が維持されている。このように洗掘工長さが十分ないと (本実験では 6.5cm 以上)、下流側の跳水の影響を受けて洗掘防止工の機能を維持できない。なお、背後地の跳水形成状況やその不安定化に及ぼす局所洗掘工の長さの影響は、本実験のみでは実験ケース数が不十分であり、定量的には十分検討できていないと言え難い。今後、実験ケース数を増やして、詳細に検討する必要がある。

c) 堤体と矢板間の距離 L_2 の影響

次に堤体と矢板間の距離 L_2 を変えた時の洗掘状況 ($t=192\text{s}$) と水面形を図-11 に示す。 $L_2=30\text{cm}$ では矢板近傍で局所洗掘が進行するが、 $L_2=90\text{cm}$ では基礎地盤の洗掘量を抑制できている。これは、相対的に離れた位置に矢板を置くことで、常流を安定化させ、背後地盤上の水深を増加させると共に底面せん断力を減少させ、結果として基礎地盤侵食を抑えているためである。さらに、矢板が無いと、背後地の基礎地盤全体が掃流されるため (図-7)、広域洗掘工の有用性を向上させるには適正な

図-11 2つの L_2 での背後地の洗掘形状 (Case C, $L_1=6.5\text{cm}$, $t=192\text{s}$)

図-12 広域・局所洗掘工敷設時における堤体の面積残存率の時間変化

距離 L_2 を保つ必要性が示唆された。

4. 越流侵食実験の結果と考察

洗掘対策工の配置条件と堤防の耐越流侵食性の関係を調べるために、従来・新形式堤防に対して局所洗掘工と広域洗掘工を敷設した時の堤体侵食状況を図-12 に示す。ここでは、4 ケースにおける堤体の面積残存率 (時々刻々の堤体面積を初期断面積で除したもの) の時間変化を表示している。まず、従来形式では、局所工使用時には、310s 辺りから堤体の侵食が始まり、616s には完全に破堤した。ここでは、洗掘工下部から侵食が堤体側に進行し、やがて堤体に達した後に洗掘工の流出や裏のり面の被覆工の不安定化・流出、最終的に破堤に至っていた。一方、同じ従来形式堤防における広域工のケースでは、侵食開始は706s であるが、そこから面積残存率が90%程度を維持し、その後、1600s 頃に破堤した。本越流実験スケールから鑑みた想定決壊時間は600s であることから、広域工を用いることにより、従来形式堤防においても、この条件をクリアできていることが示された。

次に、新形式堤防における結果に着目すると、従来形式と同様に、広域工設置時の方が局所工の場合よりも面積率が大幅に増加しており、破堤時間も1530s から2300s まで伸びている。このように、本実験条件の範囲では、

従来形式・新形式堤防共に、広域洗掘防止工が堤体の耐越流侵食性向上策として極めて有用であることが実証された。

5. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 裏のり面背後の洗掘量は、裏のり面勾配の影響を大きく受けており、1割勾配>5分勾配>2割勾配の順に大きい。また、裏のり面が急勾配ほど、最大洗掘深は堤防近くに現れる。
- 2) 洗掘実験により、下流側に矢板を設置しないと、裏のり尻下流側の侵食が顕著となり、その影響が波及して裏のり尻部の洗掘の顕在化を引き起こす。そのため、広域洗掘工における下流側の矢板設置は、裏のり尻部の洗掘防止に大きく寄与する。
- 3) 局所洗掘工の敷設により、背後地の洗掘量は大幅に減るが、洗掘工長さが十分ないと下流側の跳水の影響を受けて洗掘防止工の機能を維持できない。
- 4) 洗掘工の配置条件により、堤防の耐越流侵食状況が変化し、本条件では下流側の矢板を伴う広域洗掘工が対策工として有用であることが示された。

なお、本研究では、模型実験の縮尺 1/25 や 1/70 と小さいことや基礎地盤厚さも堤体高さから最大で 3 倍程度しか取れていない。今後、大型水路を用いて実物大に近いスケール実験を通して検証を行う予定である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(B) (研究代表者：二瓶泰雄) によって実施された。また、本実験を遂行するに当たり、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の学生諸氏には、多大なご協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府：平成23年度防災白書，第 I 部第1編第2章，2012。
- 2) 土木学会：水理公式集 [平成 11 年版]，丸善，pp.194-205，1999。
- 3) 吉川勝秀（編著）：河川堤防学 新しい河川工学，技報堂出版，pp.1-278，2008。
- 4) 中央防災会議：「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」中間とりまとめに伴う提言 ～今後の津波防災対策の基本的考え方について～，<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/pdf/teigen.pdf>，2011（閲覧日：平成25年5月17日）。
- 5) 倉上由貴，二瓶泰雄，矢田孝次朗，山崎達也，山口晋平，川邊翔平，菊池喜昭，龍岡文夫：耐越流侵食性向上のための河川堤防補強技術の提案，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69，No.4，pp.I_1219-I_1224，2013。
- 6) 倉上由貴，二瓶泰雄，川邊翔平，菊池喜昭，龍岡文夫：ジオテキスタイル補強土を用いた耐越流侵食河川堤防の提案 Vol.28，pp.265-272，2013。
- 7) 柳沢舞美，二瓶泰雄，山口晋平，川邊翔平，龍岡文夫：海岸砂丘と補強盛土技術を組み合わせた新形式防潮堤の提案，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.59，pp.I_886-I_890，2012。
- 8) 松島健一，毛利栄征，桐博英，丹治肇，堀俊和：越流津波による盛土形式の防潮堤の水理模型実験—ジオテキスタイルによる被覆工の引剥がれ対策の有効性—，第 48 回地盤工学会研究発表会，pp.1215-1216，2013。
- 9) 国際ジオシンセティクス学会日本支部 ジオテキスタイルによる粘り強い強化防潮堤開発委員会：ジオテキスタイルによる粘り強い強化防潮堤設計・施工マニュアル（案），pp.1-155，2014。
- 10) 福岡捷二，藤田光一，加賀谷均：アーマ・レビー法尻工の水理設計，水理講演会論文集，Vol.31，pp.365-370，1987。
- 11) 福島雅紀，佐野岳生，成田秋義，服部敦：航空測量データ等を用いた津波による河川堤防の侵食実態調査，河川技術論文集，Vol.18，pp.369-374，2012。
- 12) 鳩貝聡，諏訪義雄，加藤史訓：津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.I_406-I_410，2012。
- 13) 齊藤隆：水平噴流による洗掘に関する研究，土木学会論文報告集，No.282，pp.53-65，1979。

(2015.3.18 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON SCOURING AND ITS PROTECTION AT TOE OF BACK SLOPE OF DIKE DUE TO OVERFLOW

Yusuke YOSHIMORI, Yuki KURAKAMI, Yasuo NIHEI and Mayu MORITA

Failures of armored dikes due to tsunami overflow are mainly caused by outflow of concrete panels and scour at the toe of back slope of dike. To solve the latter issue, we examined fundamental property of scour at the tow of back slope of dike. We also clarified the effects of arrangement conditions of scour protection on scour property. For these, we conducted laboratory tests for scouring and overflow erosion using two types of scouring protections. The results indicated that 1) scouring at the toe of back slope was significantly affected by the gradient of back slope, and 2) scouring property and dike erosion were appreciably dependent on arrangement conditions of scour protection, showing the fundamental validity of a wide area scour protection, in which sheet pile far away from the toe of back slope was installed.